

国家自然科学基金重点项目(41030750)资助

国家重点基础研究发展计划项目(2013CB036003)资助

国家自然科学基金(41102201, 41302233, 41202218)资助

交通运输部建设科技项目(2013318J12330)资助

江苏高校优势学科建设工程项目资助

中国博士后科学基金项目(2014T70121)资助

岩石破坏临界现象与信息识别

Yanshi Pohuai Linjie Xianxiang Yu Xinxì Shibie

孙 强 秦四清 薛 雷 著
闫鹏飞 李厚恩 朱术云



中国矿业大学出版社

国家自然科学基金重点项目(41030750)资助

国家重点基础研究发展计划项目(2013CB036003)资助

国家自然科学基金(41102201,41302233,41202218)资助

交通运输部建设科技项目(2013318J12330)资助

江苏高校优势学科建设工程项目资助

中国博士后科学基金项目(2014T70121)资助

岩石破坏临界现象与信息识别

孙 强 秦四清 薛 雷 著
闫鹏飞 李厚恩 朱术云

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是关于岩石破坏过程中物理力学现象与临界信息识别的入门专著。本书从主要岩石脆性破坏的物理过程入手,重点对岩石破坏过程的力学参数(强度、变形)与物理参数(波速、电阻率、声发射、电磁辐射等)进行了分析,给出了系统完整的研究思路和方法。本书突出了岩石脆性破坏的物理演化过程,对临界破坏信息进行了识别分析,并从试验、理论、工程实践角度给出了相应的印证,为相关的岩石力学研究提供了有益借鉴。

本书可供从事地质工程、土木工程、岩土力学的专家、学者以及相关专业的研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩石破坏临界现象与信息识别/孙强等著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2014. 11
ISBN 978 - 7 - 5646 - 2501 - 6

I. ①岩… II. ①孙… III. ①岩体破坏形态—临界现象—信息处理 IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第235080号

书 名 岩石破坏临界现象与信息识别
著 者 孙 强 秦四清 薛 雷 闫鹏飞 李厚恩 朱术云
责任编辑 陈 慧
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 9.75 字数 186 千字
版次印次 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

岩体破坏是导致众多工程事故和地质灾害发生的重要原因。关于岩石累进性动态破坏过程,仍然是当前研究有待突破的重要问题。岩石破坏过程中,岩石的物理力学参数会发生重大变化。因此,基于应变、应力、声发射、视电阻率、波速等多物理场测试结果,揭示不同应力水平下的岩石累进性破坏机制,阐明岩石脆性变形破坏过程中多物理场的时空特征变化,是非常有价值的。

岩石由多种矿物成分构成,而矿物本身又是由键能(离子键、共价键)控制下的多种微观粒子(原子、离子和分子等)构成。外力作用下,岩石内部微观粒子间发生相对运动,造成键能的破坏,从而产生能量(动能、势能、声能、热能、电磁能、放射能等)的释放。导致其宏观物理力学特征的如下变化:孔隙和裂隙的变化,应力-应变-强度性质的改变,声发射、电磁辐射的产生,渗透率、电阻率、红外辐射、波速、放射性能量的变化等。在上述变化过程中,应力-应变所表征的是岩石加载系统的机械能,利用声发射、电磁辐射、放射性、红外辐射、渗透率、波速和电阻率等物理场的变化特征,可实现对岩石破坏信息的追踪和识别。

本书从岩石加载破坏的物理演化过程入手,对岩石破坏过程中的物理现象(声发射、电阻率、波速、电磁辐射等)进行了试验研究和理论分析。本书的特色之一是从多元信息角度对岩石破坏的临界信息进行了识别分析,并将其应用于边坡工程和煤矿底板采动破坏等工程研究。本书具有重要的学术和工程应用价值,对促进地质工程、地质力学、岩石力学、地球物理和地球化学等多学科发展将起到积极的作用。

中国工程院院士 蔡美峰

2014年11月19日

前 言

(一)

近年来,随着我国基础设施建设、资源开发力度的不断加大,涌现出大量的工程和技术问题,其中岩石破坏及其临界信息的快速识别,已成为该领域的研究热点与难点。岩石破坏失稳往往会导致严重的工程问题和地质灾害,如地震、崩塌、岩爆、滑坡、煤矿突水以及地表塌陷等,造成严重的人员伤亡与经济损失。因而,岩石破坏理论及其前兆信息快速识别的研究有着重要的现实意义和工程应用价值。

当前,关于岩石破坏研究可分为两个主要方向:(1)从断裂力学和损伤力学角度,基于试验和现场测试,着重研究岩石破坏的演化机理与物理过程;(2)通过观测和积累岩石破坏实例,借助统计结果进行经验总结。事实上,尽管通过对岩石破坏前后的直观现象和物理特征变化的测试可以得到一些客观依据,但由于岩石形成环境、本身结构与受载特征的特殊性,导致这些结果带有很大的局限性:受控于统计样本和监测精度,在应用中往往存在较大的误差。岩石内部存在大量的微破裂,导致裂纹相互作用和破裂过程十分复杂,在岩石破裂的孕育和发展过程中,旧的裂隙会进一步扩展,同时会有新的裂隙产生,岩石变形破坏过程呈现出高度非线性与复杂性。因此,需要将试验现象与岩石破坏本质特征紧密结合起来,以破裂机制和物理过程为基础,对观测结果进行系统分析,进而实现对临界破坏信息的快速有效识别。为此,我们提出了下面三个需要特别关注和研究的基础问题。

1. 岩石破坏的跨尺度损伤与临界敏感性

岩石破坏过程常表现为从稳定或缓慢的损伤积累转变为突发性破坏,这种损伤的累积和演化过程除了与其所处的工程环境等外部条件有关外,在临界破坏阶段往往体现出某种“内在性”,不依赖于外界条件的突然变化,表现为从小尺度到大尺度的加速破坏。岩石损伤破坏过程存在锁固效应和应力转移机制,接近破坏时存在应力集中及损伤局部化现象。因此,岩体破坏的跨尺度敏感性和临界敏感特性需要深入研究。

2. 岩石破坏过程中物理力学现象

岩石破坏过程中,其本身微观结构和宏观的物理力学性质会发生显著变化,

例如岩石孔隙和裂隙增多,岩石强度降低,变形增大,波速下降,渗透性增强,声发射信号增加,甚至伴随有电磁辐射、放射性辐射和红外辐射。系统分析和探讨岩石破坏过程中各种物理力学现象有助于岩石力学和相关学科的交叉与发展。

3. 岩石破坏过程信息识别与地质灾害防治

从岩石力学工程角度,岩体破坏往往体现为物理失稳,即表现为变形失控和强度失效。在岩爆、边坡失稳、煤矿采动突水等典型工程问题的研究中,如何实现灾害信息早期识别与临界预警信息判别十分重要,因此如何根据岩石破坏过程中的多元信息甄别地质体演化路径与赋存状态,进而准确确定临界预警阈值,制定有效防治措施,成为当前岩石力学工程的重要研究内容。

全书内容共分为十章。第一章为引论,提出了岩石破坏现象与研究的必要性;第二章为岩石破坏的理论研究;第三至第八章分别对岩石破坏过程中的电阻率、声发射、渗透率、波速、电磁辐射、氢辐射变化进行研究和讨论;第九章通过不同的实例对岩石破坏演化过程进行了分析,有助于对临界破坏物理力学现象的应用有更深入的理解;第十章对本书研究成果进行了总结和说明。

本书是主著者多年研究和认识的总结,同时成书过程中也参阅、吸纳了其他学者的研究成果。孙强撰写了第一章、第三至第十章的主体内容,并参与了第二章的讨论;薛雷撰写了第二章的主要内容,并参与了第九章内容的讨论;闫鹏飞参与撰写了第九章;李厚恩、朱术云参与了第三章和第五章的撰写;秦四清研究员参与了本书问题的讨论,审阅了全文并提出了修改意见。本书所涉及的问题探索性较强,难免有错误之处,衷心希望读者批评指正。

特别感谢蔡美峰院士为本书作序,衷心感谢姜振泉教授对研究的支持和对主著者的鼓励与帮助;感谢刘盛东教授和王勃老师的鼓励和支持;感谢中国矿业大学资源学院煤矿工程地质所各位老师们的帮助;感谢中国矿业大学安全学院刘晓斐老师对本书试验的支持;感谢河南能源化工集团焦煤公司杨建增的帮助;感谢中国地质调查局水文地质环境地质调查中心杨秀元的帮助;感谢中煤科工集团西安研究院吕汉江的帮助;感谢中国科学院工程地质力学重点实验室各位老师的支持。

感谢国家自然科学基金重点项目(41030750)、国家重点基础研究发展计划项目(2013CB036003)、国家自然科学基金(41102201,41302233,41202218)、交通运输部建设科技项目(2013318J12330)、江苏高校优势学科建设工程项目和博士后科学基金项目(2014T70121)在经费方面的支持。

(二)

也许是恋旧,喜欢追忆过去的事情;也许是为了“曾经的遗憾”而不舍,但更多的或许是战斗过的情谊。在离开北京参加工作以后,经常想起那些在 439 和

616 一起“吵闹”的兄弟姐妹,想起曾经一起战斗在球场、战斗在“红警”地域、战斗在祖国需要的“战场”。时间是一坛老酒,越久越香郁,尽管天南海北,大家战斗在不同的岗位、不同的领域。举杯明月照,山海不隔情。

潘喜才,已经“漂泊”海外 6 年多,并拿到了纯“德国制造”博士学位,我们常常聊起当年在 105 的那些日子;曾去过杭州,受到万龙热情招待,谈起 2003 年那个夏天在石家庄的晚上,坐在河北剧院台阶上闲侃的话题;2012 年的春节前,曹明老大哥陪着我们逛遍了玉溪,冬天却吹着春天和煦的风,夜市下挂满了柿子的树,小巷子的那些小吃。工作以后,受到龚绪龙和赵春虎两位老同学的特别关照,在这里表示衷心的感谢。

感谢我的研究生同学胡秀宏、童志怡等,尽管已经不在一起学习很久,仍然经常一起聊天、一起讨论,讨论那些属于我们的和不属于我们的话题。感谢我的师弟高千,身在异国他乡,却常常一起交流。在此,对各位老师和同窗好友们再次表示衷心的感谢!向所有师长、朋友和亲人表示衷心祝福!

孙强

2014 年 5 月

目 录

第一章 岩石破坏过程中的物理力学现象	1
1.1 引言	1
1.2 本书主要内容之间的关系	4
参考文献	5
第二章 岩体破裂过程临界扩容应力与应变阈值研究	8
2.1 引言	8
2.2 临界扩容应力阈值和应变阈值试验研究	10
2.3 临界扩容应力阈值和应变阈值理论研究	19
2.4 本章小结	28
参考文献	29
第三章 岩石破坏过程中的电阻率变化	34
3.1 引言	34
3.2 岩石破坏与电阻率变化试验	34
3.3 试验结果分析	36
3.4 本章小结	49
参考文献	50
第四章 岩石破坏过程中的声发射变化	52
4.1 引言	52
4.2 岩石破坏与声发射变化试验	52
4.3 声发射与岩石加载损伤	59
4.4 含水率对岩石声发射的影响	62
4.5 本章小结	65
参考文献	65
第五章 岩石破坏过程中渗透率变化	69

5.1 引言	69
5.2 岩石伺服渗透试验与分析	71
5.3 岩石渗透突变点特征分析	77
5.4 渗透率-应变-应力函数关系	80
5.5 本章小结	86
参考文献	86
第六章 岩石破坏过程中的波速变化	90
6.1 引言	90
6.2 岩石变形破坏过程与波速变化	90
6.3 本章小结	98
参考文献	98
第七章 岩石破坏过程中的电磁辐射变化	100
7.1 引言	100
7.2 煤系岩石加载破坏与临界电磁辐射信息识别	100
7.3 本章小结	105
参考文献	106
第八章 岩石破坏过程中的氡辐射变化	108
8.1 引言	108
8.2 岩石破坏与氡辐射脉冲变化	108
8.3 本章小结	114
参考文献	114
第九章 岩石临界信息综合识别与应用	117
9.1 引言	117
9.2 岩石破坏与相关物理量变化	117
9.3 危岩体失稳动态过程分析	124
9.4 煤矿底板采动破坏与突水危险性分析	131
参考文献	139
第十章 主要结论	143
索引	145

第一章 岩石破坏过程中的物理力学现象

1.1 引言

岩石破坏失稳往往会导致严重的工程问题和地质灾害,如地震、崩塌、岩爆、滑坡、煤矿突水以及地表塌陷等,并造成惨重的人员伤亡与经济损失。

Kuksenko 等^[1,2]认为岩石破坏可分为两个阶段:① 裂纹或局部破坏随机产生,为累积阶段;② 裂纹的产生和演化从无序转为有序,导致破裂相互归并成核,此时裂纹数量和尺度加速扩大而进入非稳定破坏阶段,表现为声发射(微震)频度迅速加大,由于集结区的松弛,导致过程速率在主破坏前表现为暂时性平静。Bieniawski^[3]、秦四清^[4]等认为岩石变形与破坏过程划分为压密、弹性、稳定破裂、非稳定破裂、峰后破坏五个阶段,其中稳定破裂与非稳定破裂的分界点为岩石体积膨胀界限点。综合这些研究可知,初始条件下岩石内部所含大量微缺陷原始状态呈无序分布;在加载变形初期,岩石内部的微损伤成核和长大呈随机分布,不发生连通;随着加载和变形的发展,岩石内部微破裂不断增大直至某一临界值时,微破裂之间的连通效应增强,并快速扩展导致岩石最终破坏。上述过程恰好符合重正化思想。

重正化群理论是 20 世纪 70 年代 Wilson^[5]在处理统计物理中相变问题时提出的,其基本出发点是对系统的基本单元,经过一系列自相似变换,得出宏观系统的表述方式,其物理意义明确,利用系统在临界阈值处有尺度不变的性质可得到临界破裂概率。谢和平等^[6]研究证明,岩石的断裂损伤具有自相似分形结构,即岩石在临界破坏时不同尺度下具有相同的破坏性质,具备了用重正化群方法分析的条件。秦四清等^[4,7]用一维重正化群理论研究了岩石破坏过程,并给出了临界破坏概率,进而得出了崩滑、地震临界位移演化普适常数 1.48 和 2.59。此外,利用重正化思想,Madden^[8]把岩石宏观导电率和微裂纹联系起来进行了研究,Allegre 等^[9]研究了岩石裂纹合并问题,Smalley 等^[10]对断层临界滑动进行了研究,陈忠辉等^[11]研究了岩石的峰值强度。然而这些研究多是将问题或重正化为一维,或考虑为二维重正化,但多没考虑单元之间应力相互转移问题。真正在岩石破裂方面考虑微元体之间应力相互转移的二维和三维重正化鲜有报

道。此外,翟越等^[12]通过大量的试验表明,岩石破坏模式与加载速率密切相关,随应变率增加。

在岩石变形破坏过程中的弹性阶段与稳定破裂分界点、稳定破裂与稳定破裂的分界点附近,随着岩石内部微裂纹演化状态的改变,反映出来的物理参数也出现变化,如视电阻率、声发射、波速、渗透率等会有显著变化,尤其是在岩石破坏的膨胀点附近。如,Brace^[13]指出,在不同恒定围压和孔隙水压力作用下,大多数岩石视电阻率随轴压增加到轴向破裂应力的 50% 时有少许增高,超过轴向破裂应力的 50% 后,特别是大约 80% 以后,视电阻率下降一个数量级,这与岩石扩容密切相关;潘立友等^[14]指出扩容点(临界点)以后声发射次数和声发射能量出现突变;刘维国等^[15,16]通过研究压缩条件下岩石微裂纹发展引起的扩容以及与波速特征参数之间的关系,指出岩石波速变化与体应变关系密切;刘洪磊等^[17]的试验表明岩石渗透率在膨胀点附近存在突变行为。从大量岩石力学试验成果可知^[3,4],在岩石变形达到了其体应变膨胀界限后,将进入不稳定破裂阶段,在此阶段即使施加的差应力保持不变,其裂纹也将处于自发扩展状态,并最终导致宏观破裂。因此,通过对岩石破坏过程中不同阶段的物理参数分析,特别是在膨胀点(临界破坏点)附近的变化特征,能有效揭示出岩石的破坏特性。借助物理场信号容易传播和接收的特点,可实现检测信息的快速化、实时化。需要特别指出的是,监测和检测信息必须要岩石破坏理论及岩石本构关系相联系,才能得到有效的分析。

在以往研究中,将岩石破坏理论与岩石物理参数(电阻率、声发射、波速等)联合分析的研究很少。试验研究方面也多处于定性阶段,研究成果很难得到推广和应用。例如,岩石破坏过程中,在峰值应力前,波速存在加速下降现象^[18,19],声发射也存在降维加速^[20-22]等,这在以往的研究中并未得到重视,也没有从理论方面得到阐释。我们通过对大量岩石试验结果统计分析发现,单轴压缩岩石破坏过程中,当应力达到峰值应力的 60% 左右时横波速度、电阻率、声发射出现明显变化;当达到峰值应力的 80% 左右时,电阻率、声发射会出现显著的突变行为。如 Bieniawski^[3]通过大量岩石力学试验表明岩石的长期强度(对应体膨胀起点)与峰值强度比值约为 0.85;郑贵平等^[18]、李元辉等^[19]的试验表明在峰值应力 64% 和 82% 左右波速存在显著变化;Madden^[8]认为在 65% 的峰值应力时岩石电阻率会有明显变化;Brace^[13]、毛桐恩等^[23]的试验表明在达到峰值应力 80% 以后,视电阻率发生显著的变化;苗胜军等^[24]试验证实单轴压缩强度 82% 附近声发射信号会发生明显变化;李元辉等^[21]研究结果表明大理岩和砂岩的应力水平在达到 85% 峰值强度的时候声发射 b 值会出现快速下降。根据表 1-1 所列不同荷载比下砂岩微裂纹扩展情形^[25]和许江等^[26]对不同应力水平的微裂隙显微镜观察统计(见图 1-1),

在应力水平达到 80% 左右时,岩石矿物颗粒和胶结物中的缺陷和微小裂隙发展为微断层,并相互作用-串联-扩展,最终导致岩石破裂。因此,岩石破裂过程中物理参数变化与临界信息有着很好的对应关系。

表 1-1 不同荷载比下砂岩微裂纹扩展情形^[25]

荷载/极限荷载	平均密度/(条/mm ²)	平均长度/mm	平均宽度/mm	裂纹扩展情况
<0.4	0.5~1.0	0.080	0.005	无明显变化
0.4~0.6	2.1	0.134	0.043	轴向 15°~30° 夹角方向孔隙明显增加
0.60~0.85	10.5	0.192	0.150	裂隙趋于轴向扩展,沿轴向发展成几条长裂隙
0.85~1.00	变化很小	少数贯通岩样,多数不变	少数可达 0.53 mm,多数不变	少数长裂隙加宽,贯通衔接砂岩结构,构造明显被破坏

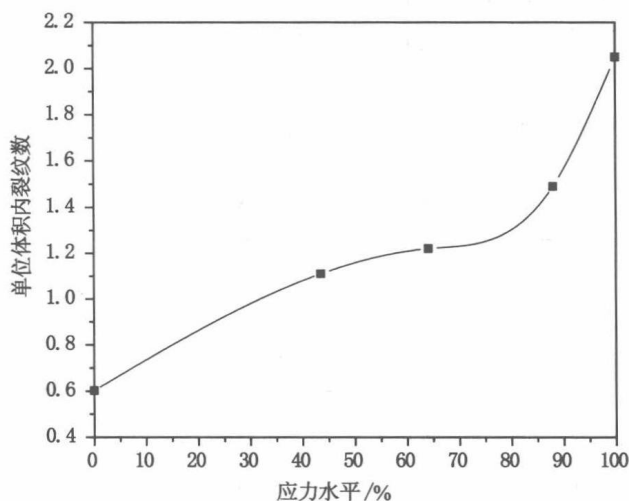


图 1-1 砂岩单轴应力下裂纹分布密度^[26]

从上述研究现状可见,目前关于岩石破坏临界现象和信息识别尚缺乏有针对性的、系统深入的研究,还存在一些问题有待进一步研究。如岩石破坏试验过程中,应力、应变、视电阻率、声发射、波速等物理力学参数变化与破坏之间的关联信息;实验室条件下,加载作用对破坏过程中岩石内部微元体之间应力作用的影响;依据物理量变化信息和破坏理论,进行岩石临界破坏概率研究,提出临界破坏信息关键识别方法。

1.2 本书主要内容之间的关系

本书主要内容包含以下 3 个方面：

(1) 根据岩石微单元体破坏的 Weibull 分布模型,考虑单元破坏后应力转移机制,依据重正化群理论,从微观-宏观角度分析得到岩石破坏的临界概率,并基于岩石力学试验成果,分析膨胀点位置与岩石峰值强度、加载变形量和声发射等物理量之间的定量关系。

(2) 通过典型破坏试验,分析不同应力水平条件下的裂纹发育规律;并同步进行多物理量(荷载、应变、声发射、视电阻率、波速等)交叉与综合测试,研究岩石破坏过程中物理力学参数的变化规律。

(3) 临界破坏识别方法研究:结合(1)和(2)研究,重点分析膨胀点附近岩石应力、应变与声发射、视电阻率、波速等物理量变化的关系,寻找临界识别因子,提出岩石破坏临界信息快速识别方法。

上述三方面内容的关系体现在:在岩石压密和扩容阶段,其内部的孔隙度会发生改变,这就导致岩石物理力学参数发生变化,特别是在临界点附近(如表1-2所列)。因此,本书的组织思路可用图 1-2 表示。

表 1-2 岩石破坏临界信息识别方法

破裂临界点 附近特征信息*		主要参数变化特征	测试方法	备注(影响因素)
物理 力学 参数 变化	渗透率	渗透率激增	渗透率测试	孔隙增加所致
	波速	波速下降,振幅比下降,品质因子突变,走时离散度增大	纵波/横波测试	
	电阻率	电阻率变化值突变	电阻率测试	受孔隙性和饱和度影响 反映微破裂特征
	声发射	振铃计数与能量计数激增,事件频率增加,分维值降低	声发射测试	
	电磁辐射	辐射强度与频率增加,表面电荷电位变化	电磁辐射测试	受破裂特征影响
	红外辐射能	温度升高,红外增加	红外遥感测试	受含水情况和表面能与电磁辐射影响
	放射性能量	氡等放射性气可能出现	放射性测试	受岩性与破裂特征影响

注: * 表示只列出了可能与破坏临界异常有关情况,并非全部。

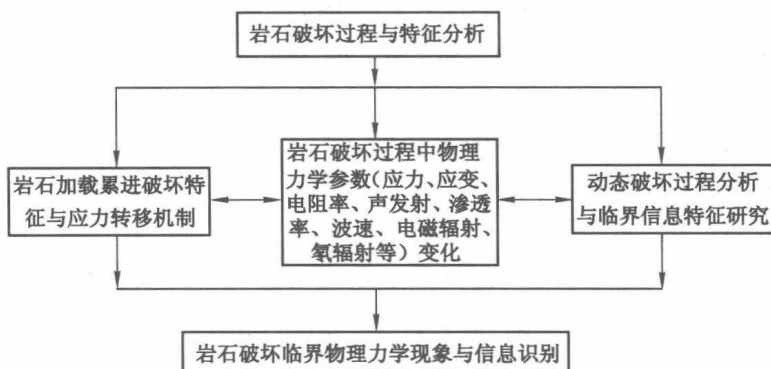


图 1-2 技术路线图

参考文献

- [1] KUKSENKO V S. Model for the transition from micro to Macro fracture (In: Rossmanith ed. Mechanics of jointed rock) [C]. Proceedings of second international conference on the mechanics of jointed and faulted ROCK-MJFR-2 Vienna, (Austria)1995, April:10-14.
- [2] KUKSENKO V S, TOMILIN N, DAMASKINSKAYA E, et al. A two stage model of fracture of rocks [J]. Pure appl Geophys, 1996, 146(2): 253-263.
- [3] BIENIAWSKI Z T. Time-dependent behavior of fractured rock [J]. Rock Mech., 1970, 2: 123-137.
- [4] 秦四清,王媛媛,马平. 崩滑灾害临界位移演化的指数律[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(15):873-880.
- [5] WILSON K G. Problems in physics with many scales of length [J]. Sci. Am. 1979, 241: 158-179.
- [6] XIE H P. Fractals in Rock Mechanics [M]. Rotterdam:A A Balkema, 1993.
- [7] 秦四清,徐锡伟,胡平,等. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J]. 地球物理学报,2010,53(4):1001-1014.
- [8] MADDEN T R. Microcrack connectivity in rocks: A renormalization group approach to the critical phenomena of conduction and failure in crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 88(B1): 585-592.

- [9] ALLEGRE C J, MOUEL J L Le, PROVOST A. Scaling rules in rock fracture and possible implication for earthquake prediction [J]. Nature, 1982, 297: 47-49.
- [10] SMALLEY R F, TURCOTTE D L, SALLA A SOLLA. A renormalization group approach to the stick slip behavior of faults[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90: 1894-1900.
- [11] 陈忠辉,谭国焕,杨文柱. 岩石脆性破裂的重正化研究及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2):183-187.
- [12] 翟越,马国伟,赵均海,等. 花岗岩在单轴冲击压缩荷载下的动态断裂分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3):385-390.
- [13] BRACE W F. Distatancy-related electrical resistivity changes in rocks [J]. Pageoph, 1975, 12(86):207-217.
- [14] 潘立友,杨慧珠. 冲击地压前兆信息识别的扩容理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(s1):4528-4530.
- [15] 刘维国,单钰铭,傅荣华,等. 岩石扩容现象与超声横波特征参数相互关系研究评述[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(1):87-91.
- [16] 刘维国,单钰铭,傅荣华. 岩石扩容过程中的体积应变与超声横波速度[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(4):360-364.
- [17] 刘洪磊,杨天鸿,于庆磊,等. 凝灰岩破坏全过程渗流演化规律的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(7):1030-1033.
- [18] 郑贵平,赵兴东,刘建坡,等. 岩石加载过程声波波速变化规律实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(8):1197-1120.
- [19] 李元辉,赵兴东,赵有田,等. 不同条件下花岗岩中声波传播速度的规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(9):1030-1033.
- [20] 尹贤刚,李庶林,唐海燕. 岩石破坏声发射强度分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19):3512-3516.
- [21] 李元辉,刘建坡,赵兴东,等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9):2559-2564.
- [22] 高峰,李建军,李肖音,等. 岩石声发射特征的分形分析[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(7):67-69.
- [23] 毛桐恩,陈大元,刘新美,等. 承载岩石地电阻率各向异性变化的实验研究与现场观测结果[J]. 地震, 1998, 18(s):33-38.
- [24] 苗胜军,樊少武,蔡美峰,等. 基于加卸载响应比的载荷岩石动力学特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3):329-333.

- [25] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [26] 许江, 李贺, 鲜学福, 等. 对单轴应力状态下砂岩微观断裂发展全过程的实验研究[J]. 力学与实践, 1986, 8(4):16-20.

第二章 岩体破裂过程临界扩容应力与应变阈值研究

2.1 引言

岩石是一种含有如微裂纹、孔穴、节理等各种缺陷的材料。在外界扰动或环境因素作用下,必然会引起这些缺陷的进一步扩展、汇合,同时也会产生新的微裂隙和微裂纹^[1]。研究表明^[2-6]:岩石破坏过程全应力应变曲线通常可划分为压密闭合(I)、弹性(II)、稳定破裂(III)、非稳定破裂(IV)、峰后破坏(V)五个阶段。不同阶段分界点的应力通常称之为:闭合应力阈值 σ_{cc} 、起裂应力阈值 σ_{ci} 、扩容应力阈值 σ_{cd} 以及峰值应力阈值 σ_f ,其相应的轴向应变阈值分别以 ϵ_{cc1} 、 ϵ_{ci1} 、 ϵ_{cd1} 和 ϵ_{f1} 表示(如图2-1所示)。

为便于表述,后续章节将上述应力和应变阈值($\sigma_{cc}, \epsilon_{cc1}$)、($\sigma_{ci}, \epsilon_{ci1}$)、($\sigma_{cd}, \epsilon_{cd1}$)和(σ_f, ϵ_{f1})分别用(σ_a, ϵ_a)、(σ_b, ϵ_b)、(σ_c, ϵ_c)和(σ_d, ϵ_d)表示。

岩石在漫长的地质演化过程中,经历复杂的物理、化学等作用,这也导致其内部往往分布有尺度不一的缺陷。故在外荷载作用下,图2-1所示的五个演化阶段所表现出的微观、宏观性状各不相同。在外荷载小于 σ_a 的I阶段,岩石应力应变响应呈非线性,岩样内部初始天然微裂纹大多由张开状态逐渐向闭合状态过渡,体积呈减小趋势,而刚度则逐渐增大。随着外荷载增大,并介于 σ_a 和 σ_b 之间时(II阶段),原本张开的微裂纹基本处于闭合状态,此时岩样进入弹性状态,应力应变响应近似呈线性关系,刚度基本保持不变,但体积随着荷载的增大仍呈减小趋势。进入III阶段后,随着荷载进一步增大,尽管岩样体积仍在减小,但是部分原先闭合的微裂纹开始重新扩展,同时伴随着一些新裂纹起裂,故裂纹占据空间有增大趋势,与II阶段相比,其体积缩小趋势放缓。III阶段裂纹起裂、扩展基本属于个体孤立行为,相互之间作用不是很强,属于稳定破裂阶段,当外界荷载不再增加时,裂纹不会进一步扩展。当外荷载超过 σ_c 后进入IV阶段,裂纹之间相互作用明显增强,裂纹扩展进入非稳定破裂阶段,即使外部应力不再增加,裂纹也会自发扩展,此阶段岩样体积开始扩容。进入V阶段,对于单轴或者低围压三轴岩样,通常一旦应力超过峰值应力 σ_d ,岩样则发生宏观破裂,失去承载能力;而对于高围压岩样,由于围压效应,其承载能力并未彻底消失,而是逐渐降低